第47卷　第4期
2024年4月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47　No. 4
Apr. 2024

基于连续观测数据的毛乌素沙地生长季土壤水分动态及其对降雨的响应

成　龙[1,2]，吴　波[1,2]，贾晓红[1,2]，殷　婕[1,2]，费兵强[1,2]，
张令光[1,2]，岳艳鹏[1,2]，孙迎涛[1,2]，李　佳[1,2]

（1. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所，北京　100091；
2. 荒漠生态系统与全球变化国家林业和草原局重点实验室，北京　100091）

摘　要： 水分是制约半干旱区沙地植物生长发育和生态建设的关键非生物因子。于2008—2010年和2018—2021年生长季（4—10月）对毛乌素沙地流动、半固定和固定沙地0~100 cm深土壤水分进行了连续观测，系统分析了不同固定程度沙地土壤水分动态变化规律及其对降雨的响应。结果表明：（1）受降雨季节变化的影响，流动、半固定和固定沙地不同深度土壤水分季节变化一般呈∽型或双峰型，10 cm和30 cm深土壤水分含量波动较大，60 cm和100 cm深土壤水分含量波动较小。（2）3种固定程度沙地生长季土壤水分动态差异明显，总体来看，流动沙地土壤水分状况最好，且土壤水分含量变化相对平缓，固定沙地土壤水分状况最差，且土壤水分含量变化最为剧烈，半固定沙地居于二者之间；固定沙地10~30 cm深土壤水分状况好于半固定沙地和流动沙地，30~100 cm深土壤水分状况则相反。（3）降雨格局是形成土壤水分时空格局的主要原因，随降雨事件降雨量增加，降雨的入渗深度逐渐增加；但是固定沙地土壤水分的深层补充需较强的降雨和较长的时间。生长季降雨事件以小降雨事件为主，表层土壤水分波动更剧烈。生长季初期降雨较少且以小降雨事件为主，10 cm以下土壤水分补充困难，土壤水分状况较差。流动沙地和半固定沙地10~30 cm深土壤水分状况好于30~100 cm深土壤，而固定沙地土壤水分状况则相反。研究结果可为半干旱区沙化土地近自然植被恢复与固沙植被稳定性维持提供科学依据。

关 键 词： 毛乌素沙地；生长季；土壤水分时空格局；降雨事件；降雨
文章编号： 1000－6060(2024)04－0648－14(0648～0661)

土壤水分作为陆地生态系统水循环过程的重要组成部分，是陆地表面和大气相互作用的重要介质，受到气候、土壤、植被等诸多环境要素的影响，在时间和空间上表现出强烈的异质性[1-3]。干旱、半干旱区降水量少，水资源匮乏，土壤水分是植物生长发育的主要生态限制因子，对植被的空间分布有重要影响[4-6]。大气降水是土壤水分的主要来源，土壤水分的动态变化与降雨密切相关。植物生长状况、生物土壤结皮发育状况以及土壤组成和结构会影响降雨的入渗过程和土壤水分的动态变化[7-11]。

毛乌素沙地作为我国北方4大沙地之一，固定、半固定和流动沙地镶嵌分布，流动和半固定沙地植被较少，风蚀作用强烈，土壤质地和结构较为均一；固定沙地植被覆盖度较高，通常伴有生物土壤结皮的发育，地表较为稳定，表层土壤黏粉粒含量和有机质含量较高[12]。与流动沙地和半固定沙地相比，固定沙地表层土壤持水能力较强，不利于降雨入渗，影响了降雨的有效性[13-14]。尽管毛乌素沙地土

收稿日期： 2023-06-12；　**修订日期：** 2023-12-13
基金项目： 科技兴蒙行动重点专项（KJXM-EEDS-2020006）资助
作者简介： 成龙（1993-），男，博士，主要从事干旱半干旱区生态水文学研究研究. E-mail: longcheng1993@yeah.net
通讯作者： 吴波（1968-），男，博士，研究员，主要从事景观生态学研究. E-mail: wubo@caf.ac.cn

壤水分已经开展了大量研究，但现有的研究多采用定时、定点取样，分析典型地貌条件下土壤水分的变化特征，数据量较少，且连续性较低，难以全面反映土壤水分动态变化规律及其对降雨的响应特征。本研究选取以黑沙蒿(*Artemisia ordosica*)为建群种的固定、半固定和流动沙地，连续观测生长季降雨量和不同深度土层的土壤水分含量，揭示生长季沙地土壤水分的动态变化规律，分析不同固定程度沙地土壤水分对降雨响应的差异，以期为半干旱区沙化土地近自然植被恢复与固沙植被稳定性维持提供科学依据。

1　研究区概况

研究区位于毛乌素沙地腹地，行政区域上隶属于内蒙古自治区鄂尔多斯市乌审旗(38°08′~38°10′N，108°37′~108°39′E，图1)，平均海拔约1200 m。该区属温带半干旱大陆性季风气候，生长季为每年的4—10月，年均气温8.4 ℃，年均降水量300~350 mm，降水年际变化大，多雨年降水量可达少雨年的2~4倍，年内分配不均，7—9月降水量约占年降水量的60%~70%；年均蒸发量1800~2500 mm。植被以稀疏、低矮的沙生植被为主，黑沙蒿是最主要的建群种，根系主要分布于0~100 cm土层[12,15-16]；固定沙地生长季平均植被盖度大于30%，半固定沙地生长季平均植被盖度10%~30%，流动沙地生长季平均植被盖度一般小于10%[16]。固定沙地上普遍分布着生物土壤结皮[12]。土壤为风沙土，质地粗、结构疏松。研究区地下水埋深大于5 m。

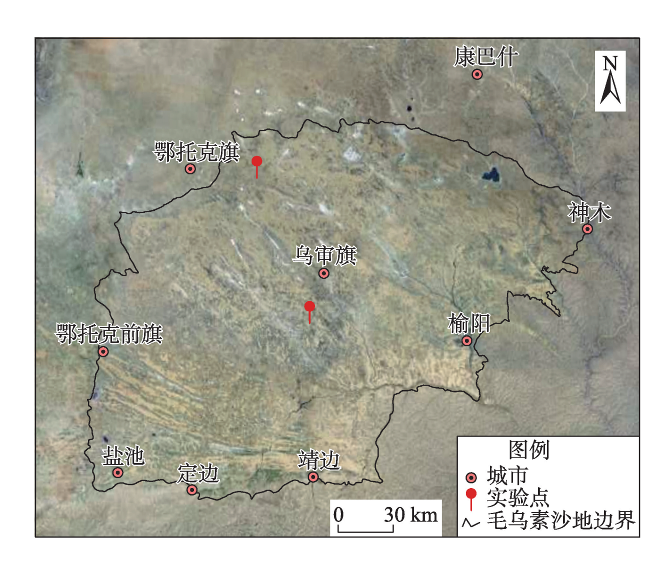


图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

2　数据与方法

2.1　数据观测

本研究采用EM50土壤温湿度测量系统(METER，Pullman，Washington，USA)观测土壤水分。该系统采用的是ECH2O EC-5土壤水分传感器，适用于沙地土壤水分观测。在乌审旗图克镇(39°03′22″N，108°24′06″E)和苏力德苏木(38°20′58″N，108°45′24″E)分别选取典型的平坦沙地设置固定样地，EM50分别于2007年5月和2017年5月在野外安装，对固定、半固定和流动沙地土壤水分进行连续观测。土壤水分传感器安装深度为10 cm、30 cm、60 cm和100 cm，数据记录时间间隔为30 min。1959—2014年降水数据来自与研究区相近的乌审旗气象站，测定精度为0.10 mm；2008—2010年和2018—2022年降水数据采用样地附近架设的自动气象站测定，每30 min记录一次数据，测定的精度分别为0.25 mm和0.10 mm。为减少仪器安装过程中对土壤扰动所造成的误差，本研究选取2008—2010年和2018—2021年生长季(4—10月)土壤水分数据和降水数据进行分析。因为仪器故障，2010、2018年和2019年4—10月流动沙地土壤水分含量数据缺失。观测期间图克镇(2008—2010年)和苏力德苏木(2018—2022年)的植被盖度和生物土壤结皮盖度变化较小，图克镇样地固定、半固定和流动沙地植被盖度分别为37.80%、18.75%和0，生物土壤结皮盖度分别为88.73%、39.21%和0，苏力德苏木样地固定、半固定和流动沙地植被盖度分别为41.67%、24.52%和7.89%，生物土壤结皮盖度分别为74.85%、0和0。

2.2　研究方法

2.2.1　土壤水分数据校正　EC-5土壤水分传感器出厂精度为±3%，用于沙地土壤水分观测时必须进行校正。本研究采用在毛乌素沙地建立的校正方程对所有土壤水分数据进行校正[17]：

$$\theta = 0.1516 - 1.501\times10^{-3}\times \mathrm{mV} + 3.218\times10^{-6}\times \mathrm{mV}^2 \quad (1)$$

式中：θ 为土壤体积含水量($cm^3 \cdot cm^{-3}$)；mV为土壤水分传感器观测值。

2.2.2　不同深度土层土壤水分含量计算　不同深度土层日平均土壤水分含量采用公式(2)进行计算：

$$\mathrm{DSWC}_i=\frac{1}{48}\sum_{t=1}^{48}\mathrm{SWC}_t \quad (2)$$

式中：DSWC_i 为土层深度i的日平均土壤水分含量($cm^3\cdot cm^{-3}$)；SWC_t 为土层深度i在1日内第t次测定的土壤水分含量($cm^3\cdot cm^{-3}$)；t为1日内测定的次数。

不同土层深度月平均土壤水分含量采用公式(3)进行计算：

$$\mathrm{MSWC}_i=\frac{1}{m}\sum_{T=1}^{m}\mathrm{DSWC}_{iT} \quad (3)$$

式中：MSWC_i 为土层深度i的月平均土壤水分含量($cm^3\cdot cm^{-3}$)；DSWC_{iT} 为土层深度i在当月内第T天的日平均土壤水分含量($cm^3\cdot cm^{-3}$)；m为当月的天数。

2.2.3 降雨事件的统计 以无雨期间隔6 h为1次降雨事件分别对降雨量≤5 mm、5~10 mm、10~20 mm、20~30 mm和>30 mm的降雨事件发生频数和总降雨量进行统计[18]。

2.2.4 降水年型划分 采用干旱指数(Drought index, DI)对降水年型进行划分，当DI>0.35时为相对湿润年，当−0.35≤DI≤0.35时，为相对正常年，当DI<−0.35时，为相对干旱年[18-19]，计算公式如下：

$$\mathrm{DI}=\frac{P-M}{\sigma} \quad (4)$$

式中：DI为干旱指数；P为年降水量(mm)；M为多年平均降水量(mm)；σ为多年降水量的标准偏差。

2.2.5 土壤水分插值方法 采用Origin 20.0基于网格插值法绘制不同固定程度沙地10~100 cm土层土壤水分插值图。

2.2.6 统计分析 利用SPSS 19.0进行单因素方差分析，LSD用于检验不同固定程度沙地土壤水分含量之间的差异，利用Excel 2016、Origin 20.0对相关数据进行处理分析及制图。

3 结果与分析

3.1 降水特征

2008、2009、2010、2018、2019、2020年和2021年，研究区年降水量分别为346.25 mm、361.25 mm、304.50 mm、393.60 mm、332.90 mm、256.90 mm和244.40 mm，生长季降雨量可占年降水量的90%以上。2008、2009、2010、2019年生长季降雨量与多年生长季平均降雨量(1959—2014年，329.04 mm)差异较小，为相对正常年，2018年为相对湿润年，2020年和2021年为相对干旱年(表1)。不同年份生长季降雨事件均以≤5 mm的小降雨事件为主，可占当年生长季降雨事件的60%以上，2021年甚至达到80%以上；>30 mm的降雨发生频数最低，均不超过生长季降雨事件的5%，在相对正常的2019年和相对干旱的2020年甚至未发生30 mm以上的降雨(表1)。

3.2 生长季土壤水分动态

3.2.1 土壤水分的季节变化 由图2和图3发现，土壤水分的季节变化明显。不同固定程度沙地、不同土层深度土壤水分大都呈现相似的变化规律。在

表1 2008—2010年、2018—2021年生长季降雨特征

Tab. 1 Rainfall characteristics of growing seasons during 2008—2010 and 2018—2021

年份	降雨事件	≤5 mm	5~10 mm	10~20 mm	20~30 mm	>30 mm	总计/mm	DI
2008	频数	39	6	6	3	2	56	0.08
	降雨量/mm	55.00	40.00	80.50	64.00	99.00	338.50	
2009	频数	36	3	7	2	2	50	0.04
	降雨量/mm	34.00	14.50	91.00	23.50	170.75	333.75	
2010	频数	35	12	8	1	0	56	−0.35
	降雨量/mm	53.00	92.00	113.75	29.50	0	288.25	
2018	频数	18	11	12	1	2	44	0.64
	降雨量/mm	30.60	86.90	182.50	52.10	40.40	392.50	
2019	频数	40	6	11	4	0	61	−0.07
	降雨量/mm	55.00	48.50	131.00	87.00	0	321.50	
2020	频数	39	7	7	2	0	55	−0.80
	降雨量/mm	55.50	37.30	97.60	46.40	0	236.80	
2021	频数	45	5	4	1	1	56	−0.93
	降雨量/mm	57.50	42.00	68.40	22.50	31.30	221.70	

注：DI为干旱指数。

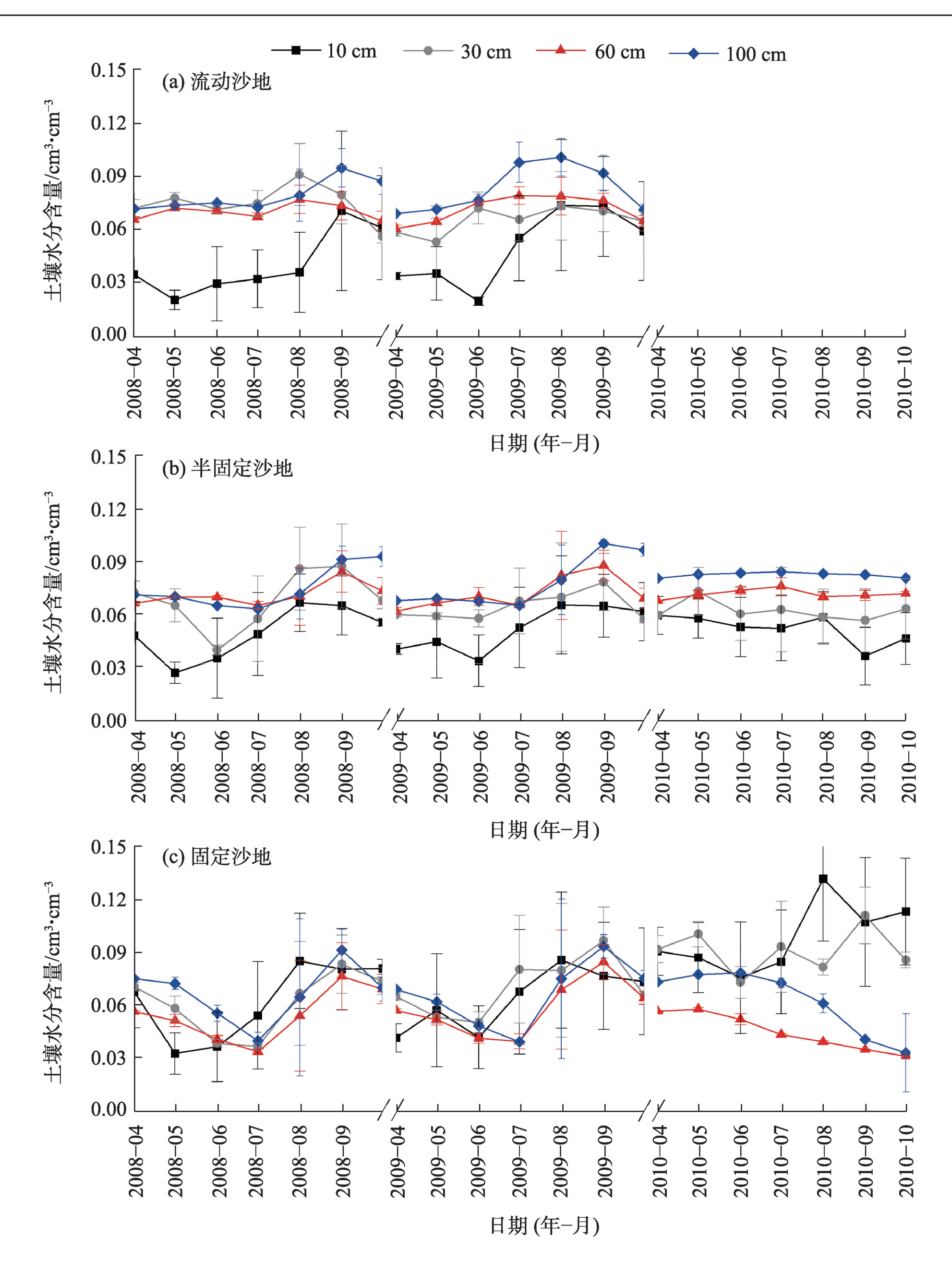


图2　2008—2010年土壤水分的季节变化

Fig. 2　Seasonal variation of soil moisture from 2008 to 2010

生长季初期(4月)土壤水分含量较高,然后逐渐下降,一般在5月或6月达到最低,7月土壤水分含量逐渐升高,一般在8月或9月达到最高,10月又有所下降,整个生长季土壤水分变化呈︶型曲线;或在生长季初期土壤水分含量较低,然后逐渐升高,一般在5月或6月达到高值,然后下降,7月或8月达到最低,随后又逐渐上升,一般在8月或9月达到高值,10月又有所下降,整个生长季土壤水分变化呈双峰型曲线。在相对正常年、相对湿润年和相对干旱年等不同降水年型,土壤水分的季节变化存在差异。

虽然2008年和2009年降雨属于相对正常年,而2020年和2021年降雨属于相对干旱年,但图克镇2008年和2009年与苏力德苏木2020年和2021年流动沙地土壤水分含量季节变化呈相似规律。流动沙地10 cm深土壤水分含量季节变化波动较大,呈典型的︶型曲线;其他深度土壤水分波动较小。图克镇流动沙地10 cm深土壤水分含量2009年6月达到最低,为0.019 $cm^3 \cdot cm^{-3}$,2009年8月达到最高,为0.073 $cm^3 \cdot cm^{-3}$。苏力德苏木流动沙地10 cm深土壤水分含量2020年5月达到最低,为

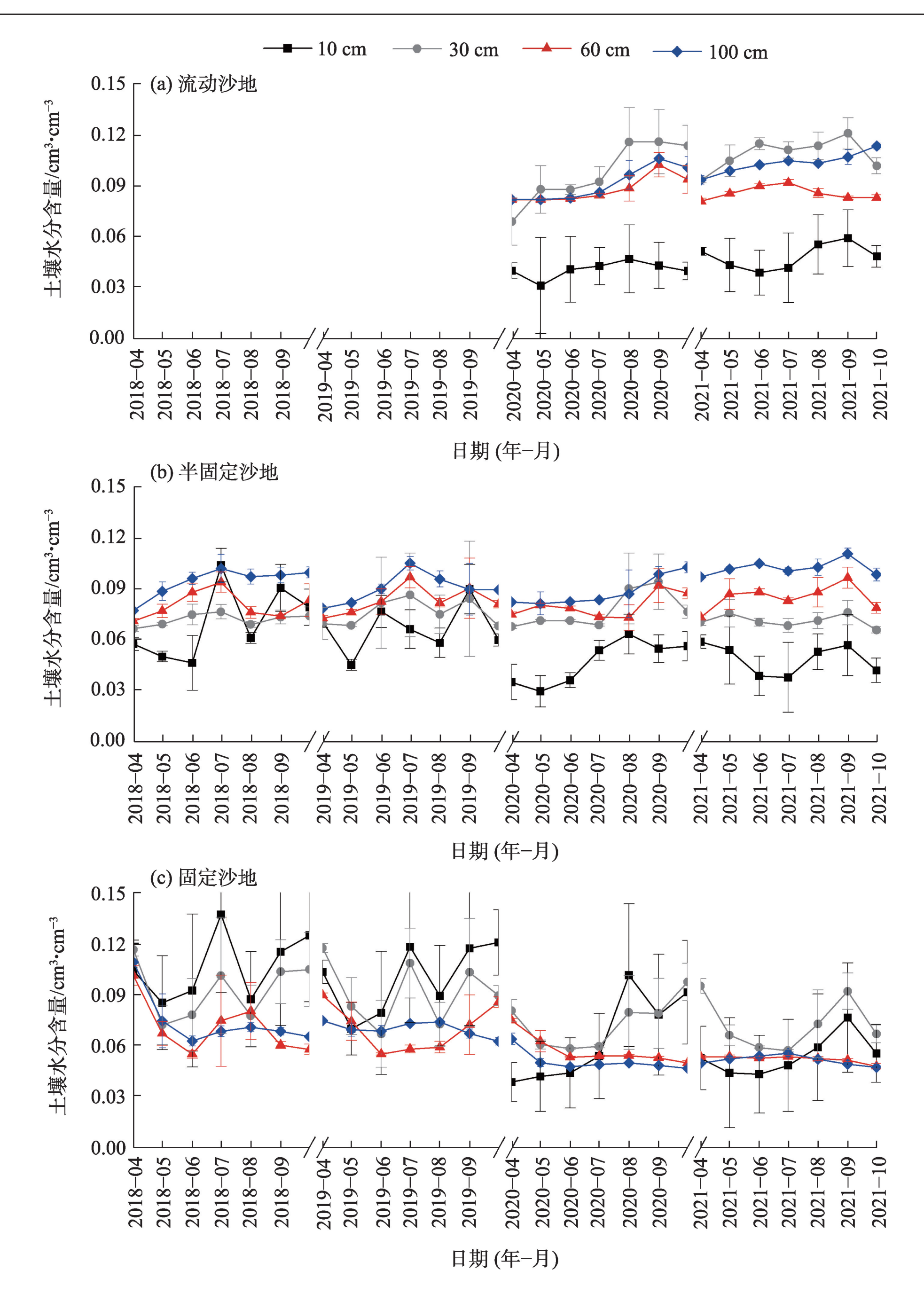


图3 2018—2021年土壤水分的季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil moisture from 2018 to 2021

0.031 cm^3·cm^{-3},2021年9月达到最高,为0.059 cm^3·cm^{-3}。图克镇流动沙地30 cm、60 cm和100 cm深土壤水分含量在0.053~0.101 cm^3·cm^{-3}之间波动,苏力德苏木在0.069~0.121 cm^3·cm^{-3}之间波动。

半固定沙地年际间差异较大。图克镇2008—2010年降雨都属于相对正常年,土壤水分季节变化呈相似规律。苏力德苏木2018年和2019年降雨分别属于相对湿润年和相对干旱年,土壤水分季节变化规律相似,而2020年和2021年降雨都属于相对干旱年,土壤水分季节变化规律相似。半固定沙地10 cm深土壤水分含量季节变化波动较大,在2008、2009、2010年和2020年表现为∽型变化,在2018、2019年和2021年呈双峰曲线;其他深度土壤水分含量波动较小。图克镇半固定沙地10 cm深土壤水分含量2008年5月达到最低,为0.027 cm^3·cm^{-3},2008年8月达到最高,为0.067 cm^3·cm^{-3}。苏力德苏木半固定沙地10 cm深土壤水分含量2020年5月达到最低,为0.030 cm^3·cm^{-3},2018年9月达到最高,为

0.104 cm³·cm⁻³。图克镇半固定沙地30 cm、60 cm和100 cm深土壤水分含量在0.040~0.100 cm³·cm⁻³之间波动，苏力德苏木在0.066~0.111 cm³·cm⁻³之间波动。

固定沙地年际间差异非常大。图克镇2008年和2009年土壤水分季节变化呈相似规律，苏力德苏木2018年和2019年土壤水分季节变化规律相似，而图克镇2010年、苏力德苏木2020年和2021年，土壤水分季节变化规律较相似。与流动和半固定沙地不同，固定沙地10 cm和30 cm深土壤水分都波动较大，60 cm和100 cm深土壤水分波动较小。固定沙地10 cm和30 cm深土壤水分含量季节变化大多呈典型的∽型曲线，2018年和2019年呈双峰曲线；60 cm和100 cm土壤水分含量在相对正常年和相对湿润年大多呈∽型曲线，而在相对干旱年波动较小且呈下降趋势。图克镇固定沙地10 cm深土壤水分含量2008年5月达到最低，为0.033 cm³·cm⁻³，2010年8月达到最高，为0.132 cm³·cm⁻³；30 cm深土壤水分含量2008年7月达到最低，为0.037 cm³·cm⁻³，2010年9月达到最高，为0.111 cm³·cm⁻³。苏力德苏木固定沙地10 cm深土壤水分含量2020年4月达到最低，为0.043 cm³·cm⁻³，2021年9月达到最高，为0.077 cm³·cm⁻³；30 cm深土壤水分含量2021年7月达到最低，为0.057 cm³·cm⁻³，2019年9月达到最高，为0.109 cm³·cm⁻³。图克镇固定沙地60 cm和100 cm深土壤水分含量在0.032~0.094 cm³·cm⁻³之间波动，苏力德苏木在0.047~0.086 cm³·cm⁻³之间波动。

3.2.2　生长季不同固定程度沙地土壤水分时空格局　图4和图5分别是图克镇和苏力德苏木整个生长季不同固定程度沙地10~100 cm深土壤水分含量插值图，直观展示了整个生长季不同固定程度沙地土壤水分时空格局。图克镇和苏力德苏木之间因为样地的植被盖度、生物土壤结皮盖度等条件存在差异，土壤水分状况也存在明显差异，总体来看，苏力德苏木样地土壤水分状况好于图克镇样地。

由图可见，不同固定程度沙地之间土壤水分含量有明显差异，总体来看，流动沙地土壤水分状况最好，固定沙地土壤水分状况最差，半固定沙地居于二者之间；固定沙地土壤水分含量变化最为剧烈，半固定沙地次之，流动沙地土壤水分含量变化相对平缓；固定沙地10~30 cm深土壤水分状况好于半固定沙地和流动沙地，30~100 cm深土壤水分状况则相反，半固定和流动沙地好于固定沙地。土壤水分的脉冲式格局在10~30 cm深比较普遍，而且流动和半固定沙地更加明显；10~60 cm深土壤水分的脉冲式格局在苏力德苏木的固定沙地非常明显，在图克镇的固定和半固定沙地也比较明显。

图克镇2008年8月中旬以前固定沙地整个土壤剖面土壤水分都比较低，只是在生长季初期的4月20~40 cm和80~100 cm深土壤水分含量稍高；半固定沙地也呈相似格局，但整体土壤水分状况比固定沙地稍好；而流动沙地30~100 cm深土壤水分状况整体较好。8月中旬以后土壤水分呈脉冲式波动，土壤水分状况好转。图克镇2009年不同固定程度沙地土壤水分呈现与2008年相似的变化格局，但也存在一些差异，2009年生长季开始后3种不同固定程度沙地土壤水分含量一直很低，流动沙地在5月下旬和7月上旬有所好转。图克镇2010年土壤水分格局与2008年和2009年不同，从时间上看，整个生长季呈相似格局，固定和半固定沙地10~60 cm深土壤水分呈现脉冲式波动格局，固定沙地土壤水分状况明显好于半固定沙地；60~100 cm深土壤水分状况则相反，半固定沙地好于固定沙地，而且7—10月固定沙地土壤水分状况逐渐恶化。

2018年和2019年降雨分别属于相对湿润年和相对正常年，2020年和2021年降雨都属于相对干旱年。从3种不同固定程度沙地土壤水分格局来看，苏力德苏木前2 a和后2 a固定沙地土壤水分格局有明显差异，后2 a土壤水分状况明显变差，5—7月土壤水分含量都比较低，8—10月10~60 cm深土壤水分呈脉冲式波动，但60~100 cm土壤水分状况更加恶化。2018—2021年半固定沙地土壤水分格局比较相似，10~30 cm深土壤水分呈脉冲式波动，但后2 a比前2 a土壤水分状况稍差，30~100 cm深土壤水分格局都呈脉冲式波动，其中2020年4—7月土壤水分状况比其他3 a稍差。2020年和2021年流动沙地土壤水分格局比较相似，即10~30 cm深土壤水分格局存在差异，30~100 cm深土壤水分格局近乎相同；2020年生长季初期4月上中旬10~50 cm土壤水分含量较低，然后至6月上旬10~30 cm土壤水分含量较低并呈脉冲式波动，7—10月10~20 cm土壤水分含量较低并呈脉冲式波动，而2021年整个生长季10~20 cm土壤水分含量较低并呈脉冲式波动。

3.3　土壤水分对降雨的响应

3.3.1　土壤水分季节变化对降雨季节变化的响应

图6显示，降雨的季节变化一般呈现出2种形态，一种为4—6月降雨量较低7—10月降雨量较高的∽

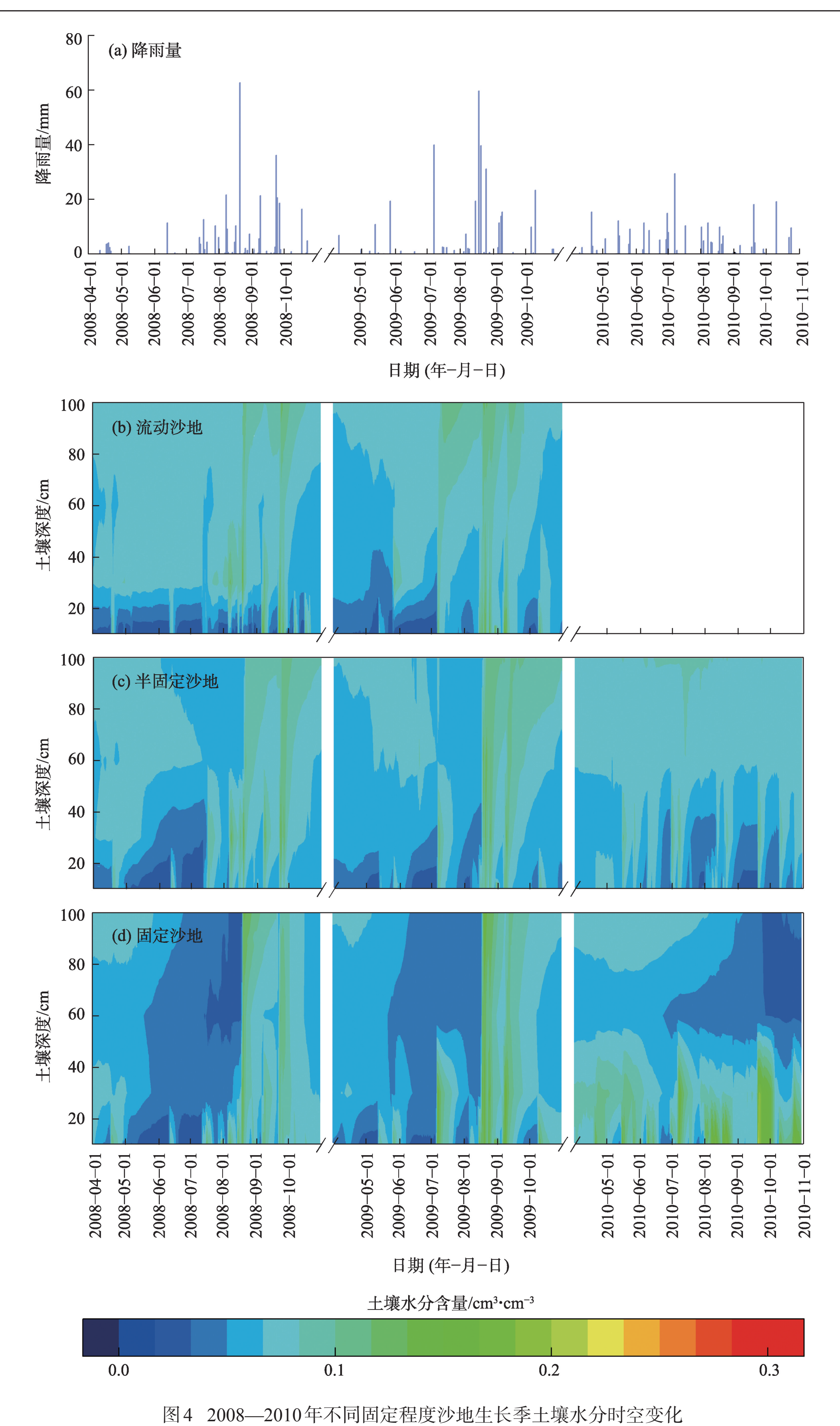


图4 2008—2010年不同固定程度沙地生长季土壤水分时空变化

Fig. 4 Dynamic changes of daily soil moisture of sandy land with different fixed degrees during the growing season from 2008 to 2010

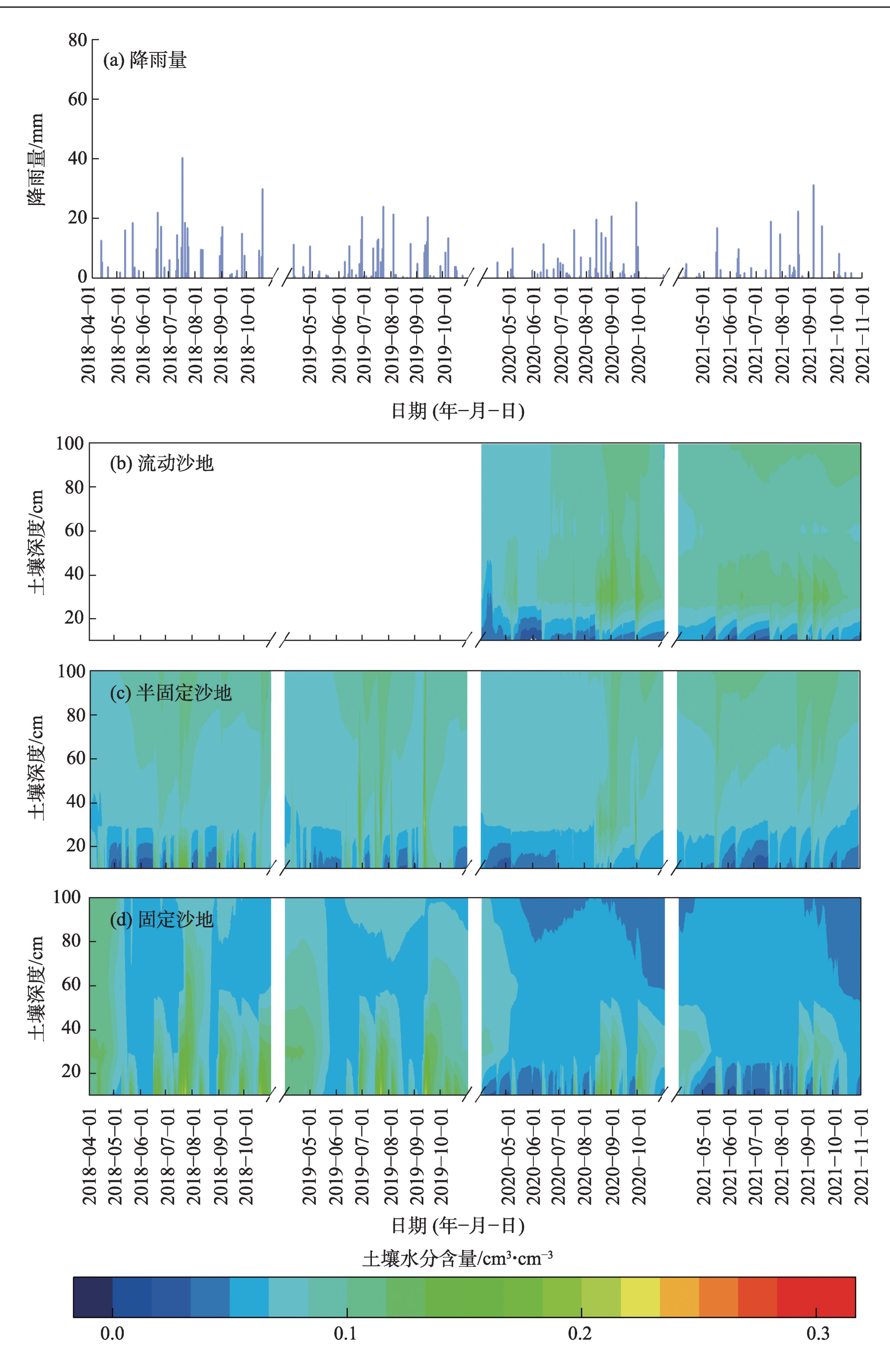


图5　2018—2021年不同固定程度沙地生长季土壤水分时空变化

Fig. 5　Dynamic changes of daily soil water content of sandy land with different fixed degrees during the growing season from 2018 to 2021

型或单峰型，如2008、2010、2020年和2021年，一种生长季前半段与后半段降雨量均出现峰值的双峰型，如2009、2018年和2019年。对照图2~3和图6，10 cm和30 cm深土壤水分的季节变化与降雨的季节变化规律基本一致，2008、2009、2020年和2021年流动、半固定和固定沙地10 cm和30 cm土壤水分含量均呈现典型的∽型曲线，是对降雨∽型或单峰型变化的直接响应，其中2009年降雨虽然呈双峰型，但是6月降雨较少，对土壤水分未产生显著影响。2018年和2019年降雨为双峰型，10 cm和30 cm

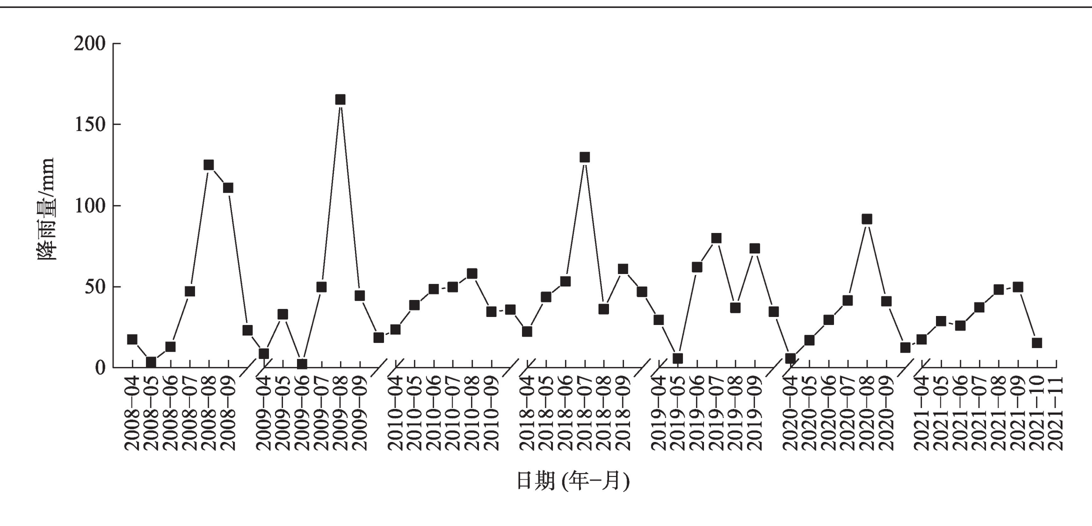


图6 降雨的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of rainfall

深土壤水分也呈双峰型。60 cm和100 cm深土壤水分对降雨季节变化敏感性降低，但其季节变化也基本反映了降雨的季节变化。

3.3.2 不同固定程度沙地土壤水分对降雨事件响应的差异 图7和图8是土壤水分对不同降雨事件响应的统计结果。由图可见，随降雨量增加，降雨事件的入渗深度逐渐增加；总体来看，相同等级降雨事件在固定沙地的入渗深度低于半固定沙地和流动沙地，且入渗至相同深度土层所消耗的时间长于半固定沙地和流动沙地。≥4 mm的单次降雨事件可以入渗至流动沙地和半固定沙地10 cm深土壤，消耗的时间≥3 h，而≥5.6 mm的单次降雨事件才能够入渗至固定沙地10 cm深土壤，且消耗的时间≥6.5 h。入渗至30 cm深土壤，流动沙地和半固定沙地需单次降雨事件≥10.5 mm，且入渗时间≥10 h，而固定沙地需单次降雨事件≥14.0 mm，且入渗时间≥

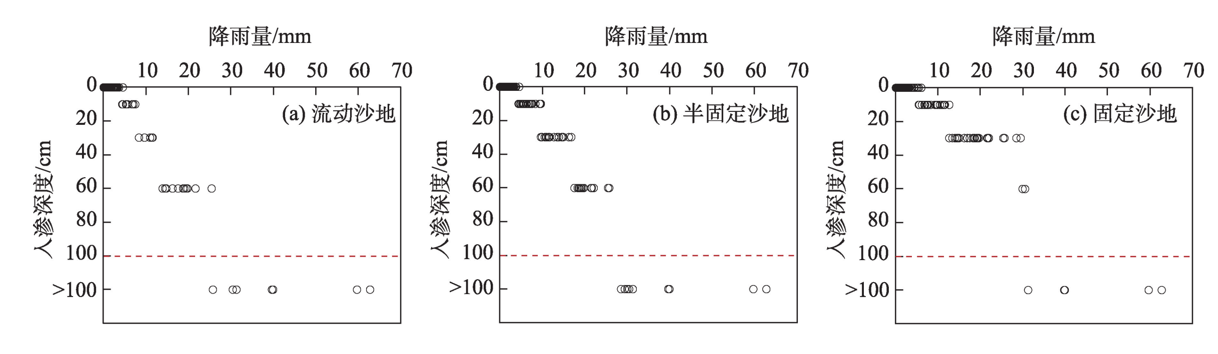


图7 降雨入渗深度与降雨事件的关系

Fig. 7 Relationship between rainfall infiltration depth and rainfall events

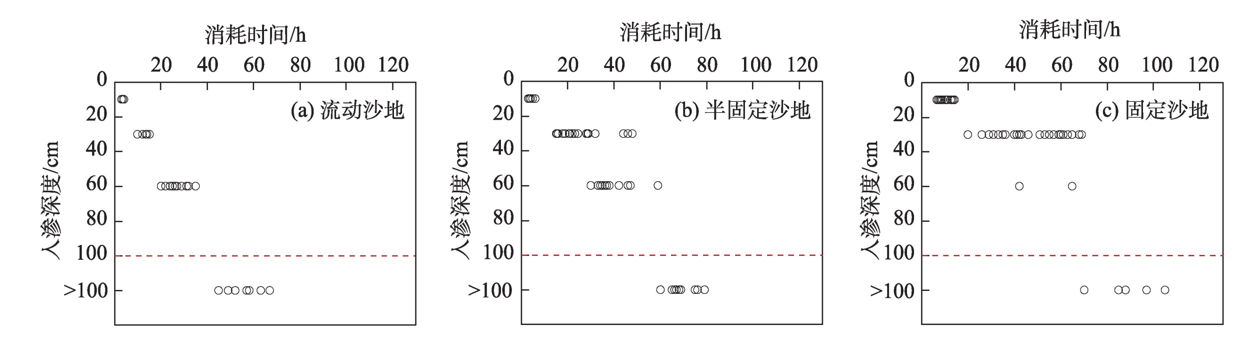


图8 降雨入渗深度与消耗时间的关系

Fig. 8 Relationship between rainfall infiltration depth and spend time

15 h。入渗至60 cm深土壤，流动沙地需单次降雨事件≥14.5 mm，且入渗时间≥20 h，半固定沙地需单次降雨事件≥18.6 mm，且入渗时间≥30 h，而固定沙地需单次降雨事件≥24.1 mm，且入渗时间≥42 h。入渗至100 cm深土壤，流动沙地需单次降雨事件≥25.8 mm，入渗时间≥45 h，半固定沙地需单次降雨事件≥26.4 mm，且入渗时间≥60 h，而固定沙地需单次降雨事件≥31.25 mm，且入渗时间≥70 h。

3.3.3 土壤水分时空格局对降雨格局的响应 图9显示了研究区生长季的降雨格局变化。由图可见，生长季降雨格局表现出明显的季节变化，4—6月降雨频数较低，且以≤5 mm的降雨事件为主，7—10月降雨频数较高，降雨事件之间时间间隔缩短，且单次降雨量较高的降雨事件出现频数增加。流动、半固定和固定沙地土壤水分时空格局与降雨格局关系密切。生长季降雨事件以小降雨事件为主，相同等级降雨事件在固定沙地的入渗深度低于半固定沙地和流动沙地，因此，与固定沙地相比，流动和半固定沙地土壤水分波动更剧烈，尤其是10 cm和30 cm的土壤表层。2008、2009、2020年和2021年，生长季初期的4—6月，降雨较少且降雨以小降雨事件为主，10 cm以下土壤水分得不到补充，土壤水分状况很差，尤其是固定沙地。2010年虽然降雨属于相对正常年，但是4—6月降雨多且有较多10~20 mm降雨事件发生，因此土壤水分状况好于降雨同属于相对正常年的2008年和2009年。2008年和2009年的7—10月、2018年和2019年的整个生长季，都有较多10 mm以上的较大降雨事件发生，因此土壤水分状况较好。

4 讨 论

4.1 土壤水分季节变化产生的原因

土壤水分的季节变化主要受降雨季节变化的影响。毛乌素沙地生长季降雨分布极不均匀，存在明显的季节变化特征，一般在4—6月降雨量较少，在7—10月，降雨量可占生长季降雨量的90%左右。不同固定程度沙地土壤水分表现出与降雨相似的季节变化特征。在固定沙地，生长季开始后，气温逐步回升，植被进入复苏期[20]，在4—6月植物蒸腾和土壤蒸发所消耗的水分远高于降雨的补充，导致土壤水分的下降；至7月，降雨开始明显增多，不仅能够满足植物蒸腾和土壤蒸发所消耗的水分，还可以对土壤水分进行补给，不同深度土壤水分含量在8月或9月达到最高值；9月以后降雨减少，土壤水分的输入量不足以满足植物蒸腾和土壤蒸发的消耗，土壤水分含量开始下降。2010、2020年与2021年60 cm和100 cm深土壤水分含量表现出先下降后趋于平缓的波动变化，其原因可能是生长季>20 mm降雨事件较少，60 cm和100 cm深土壤水分难以得到补充。在半固定沙地和流动沙地，受土壤质地的影响，表层土壤很容易形成干沙层，抑制了下层土壤水分的蒸发[21]，对下层土壤水分起到了很好的保护作用。

4.2 生长季不同固定程度沙地土壤水分含量产生差异的原因

土壤水分含量是评价土壤水分动态的重要特征，本研究发现，不同固定程度沙地土壤水分差异显著，固定沙地10~30 cm深土壤水分含量显著高于

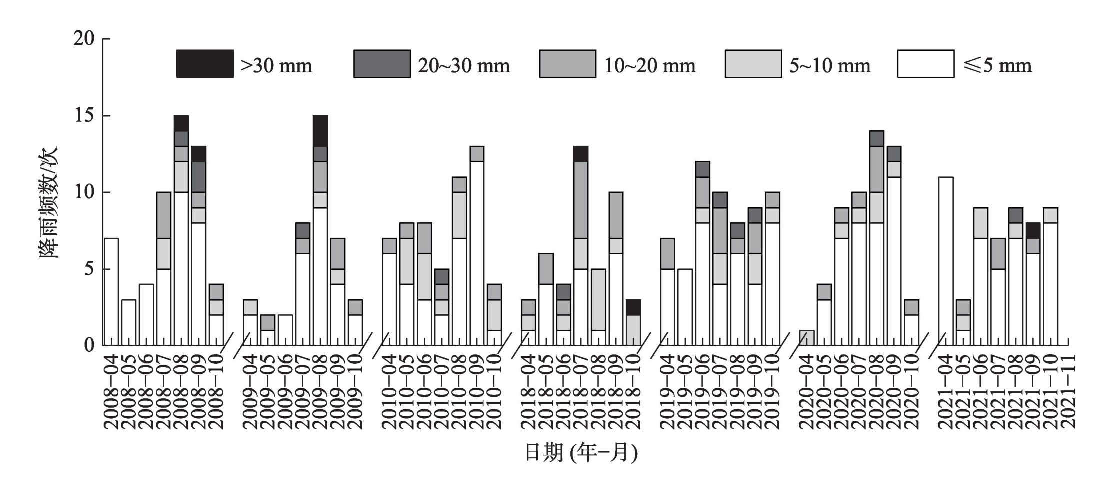


图9 生长季降雨格局

Fig. 9 Rainfall pattern during the growing season

半固定沙地和流动沙地，而30~100 cm深土壤水分含量均显著低于半固定沙地和流动沙地。这种现象的发生与不同固定程度沙地植被生长状况以及土壤的理化性质密切相关。固定沙地较高的植被和生物土壤结皮盖度，有利于土壤有机质的积累和对空气中黏粉粒的捕捉，并有效降低土壤的风蚀水蚀[22-25]。相较于流动沙地和半固定沙地，固定沙地表层土壤黏粉粒和有机质含量较高，土壤持水能力较强，虽然植被蒸腾会消耗部分土壤水分，但土壤的持水能力、植物的遮阴效果和生物土壤结皮对土壤水分的保护作用减缓了表层土壤水分的消耗[26]，保证了固定沙地表层土壤水分含量较高。流动沙地土壤砂粒含量高，保水能力差，且植被盖度很低，意味着降雨后有更多的地表受阳光的直射，土壤蒸发强烈，在很短的时间内使土壤水分下降到较低的水平[27-28]。相较于10~30 cm深土层，固定沙地30~100 cm深土壤黏粉粒含量高于半固定沙地和流动沙地，且土壤容重低于半固定沙地和流动沙地[7]，土壤的持水能力表现出与10~30 cm深土壤相似的规律。但受植被冠层截留、生物土壤结皮截留和表层土壤持水能力的影响，固定沙地30~100 cm深土壤水分入渗量低于半固定沙地和流动沙地；同时植物蒸腾拉力所导致的根系吸水进一步增加了土壤水分的消耗[29]。而在流动沙地和半固定沙地，降雨后表层土壤水分被迅速蒸发并形成干沙层，切断了下层土壤水分蒸发的通道，土壤水分主要以水汽的方式逸散至大气中[21]，干沙层以下土壤水分消耗的速率远低于固定沙地。因此，受植被盖度、生物土壤结皮分布和土壤理化性质的影响，不同固定程度沙地土壤水分表现为固定沙地10~30 cm深土壤水分含量显著高于流动沙地和半固定沙地，而30~100 cm深土壤水分含量则相反。

4.3 生长季降雨格局的变化是土壤水分时空格局变化的主要原因

土壤水分时空格局变化受降雨、植被、气象因子等因素的综合影响，其中降雨格局变化是土壤水分时空格局变化的主要原因。研究区生长季4—6月降雨频数较低，且以≤5 mm的降雨事件为主，7—10月降雨频数较多，且降雨量较高的降雨事件频数增加。这导致4—6月土壤水分补给较为困难，沙地土壤水分以消耗为主，土壤水分含量呈下降趋势。7—10月降雨量较高的降雨事件频数增多，土壤水分补给量增加，土壤水分含量增高，土壤水分状况好于4—6月。研究发现，与流动和半固定沙地相比，固定沙地降雨入渗至相同深度土层需要更多的降雨量，在科尔沁沙地[30]、黄土高原[31]等地的研究也有类似发现[1,32]，这使得在≥14 mm降雨事件发生频数较少的相对干旱年（2020年和2021年）30~100 cm土壤水分补充困难，因此7—10月土壤水分含量低于4—6月。

降雨时间间隔的长短能够很好反映生态系统的干旱周期，降雨时间间隔越长，土壤水分被植物蒸腾和土壤蒸发消耗得越多[33]。本研究发现，毛乌素沙地生长季降雨时间间隔较长，最长可达20 d（图5，2018-05-28至2018-06-16），这导致在未发生降雨期间土壤水分消耗严重，流动沙地和半固定沙地10~30 cm深土壤水分含量长期处于较低水平。但受土壤持水能力的影响，流动沙地和半固定沙地表层土壤很容易形成干沙层，切断了下层土壤水分蒸发的通道，干沙层以下土壤水分得到了很好的保护[21]，流动沙地和半固定沙地土壤水分含量空间特征表现为30~100 cm深土壤水分含量高于10~30 cm。而固定沙地受土壤理化性质的影响，表层土壤持水能力较强，导致其可以储存更多的水分，需要消耗更多的降雨才能够达到入渗至下层土壤的标准，因此下层土壤水分获得补给较为困难；虽然植物蒸腾和土壤蒸发会消耗部分土壤水分，但与30~100 cm深土壤相比，固定沙地10~30 cm深土壤水分受降雨补充更为频繁，土壤水分可长时间维持在较高的水平[34-37]，使得固定沙地10~30 cm深土壤水分状况好于30~100 cm。

5 结 论

（1）流动、半固定和固定沙地不同深度土壤水分季节变化一般呈∽型或双峰型，10 cm和30 cm深土壤水分含量波动较大，60 cm和100 cm深土壤水分含量波动较小。土壤水分的季节变化主要受降雨季节变化的影响。

（2）生长季不同固定程度沙地之间土壤水分含量有明显差异，总体来看，流动沙地土壤水分状况最好，固定沙地土壤水分状况最差，半固定沙地居于二者之间；固定沙地土壤水分含量变化最为剧烈，半固定沙地次之，流动沙地土壤水分含量变化相对平缓；固定沙地10~30 cm深土壤水分状况好于

半固定沙地和流动沙地，30~100 cm深土壤水分状况则相反，半固定和流动沙地好于固定沙地。

（3）降雨格局是形成土壤水分时空格局的主要原因。随降雨量增加，降雨事件的入渗深度逐渐增加；相同等级降雨事件在固定沙地的入渗深度低于半固定沙地和流动沙地，且入渗至相同深度土层所消耗的时间长于半固定沙地和流动沙地。生长季降雨事件以小降雨事件为主，因此，表层土壤水分波动更剧烈。生长季初期，降雨较少且以小降雨事件为主，10 cm以下土壤水分得不到补充，土壤水分状况较差，尤其是固定沙地。

参考文献（References）

[1] Shen Q, Gao G Y, Fu B J, et al. Soil water content variations and hydrological relations of the cropland-treebelt-desert land use pattern in an oasis-desert ecotone of the Heihe River Basin, China[J]. Catena, 2014(123): 52−61.

[2] Liu X P, He Y H, Zhang T H, et al. The response of infiltration depth, evaporation, and soil water replenishment to rainfall in mobile dunes in the Horqin Sandy Land, northern China[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(12): 8699−8708.

[3] 张存厚, 段晓凤, 杨丽萍, 等. 草甸草原降水特征与土壤水分对降水脉动响应——以呼伦贝尔草原额尔古纳市为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(6): 1881−1889. [Zhang Houcun, Duan Xiaofeng, Yang Liping, et al. Characteristics of precipitation and response of soil moisture to precipitation pulse in meadow steppe: A case of Ergun City in Hulunbuir steppe[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(6): 1881−1889.]

[4] Gao X, Wu P, Zhao X, et al. Soil moisture variability along transects over a well-developed gully in the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2011, 87(3): 357−367.

[5] Yu X, Huang Y, Li E, et al. Effects of vegetation types on soil water dynamics during vegetation restoration in the Mu Us Sandy Land, northwestern China[J]. Journal of Arid Land, 2017, 9(2): 188−199.

[6] 廉泓林, 李卫, 冯金超, 等. 科尔沁沙地典型固沙人工林地土壤水分时空特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学报. 2021, 41(20): 8256−8265. [Lian Honglin, Li Wei, Feng Jinchao, et al. Spatiotemporal characteristics of soil moisture and its responses to environmental factors in two typical sand-fixing plantations at the south edge of Horqin Sandy Land[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(20): 8256−8265.]

[7] 梁香寒. 毛乌素沙地不同固定程度油蒿群落水分变化过程及影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2021. [Liang Xianghan. Soil moisture dynamics and its mechanism of *Artemisia ordosica* community in Mu Us Sandy Land[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2021.]

[8] 姚淑霞. 科尔沁沙地土壤水分时空动态及其模拟研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2012. [Yao Shuxia. Temporal and spatial dynamic of soil moisture and its simulation in Korqin Sand Land[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.]

[9] 郑博文, 胡顺军, 周智彬, 等. 古尔班通古特沙漠南缘风沙土土壤水分特征与毛管水最大上升高度[J]. 干旱区地理. 2020, 43(4): 1059−1066. [Zheng Bowen, Hu Shunjun, Zhou Zhibin, et al. Maximum height of capillary rising water and characteristic of soil moisture in the southern edge of Gurbantunggut Desert[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(4): 1059−1066.]

[10] 姚雪玲, 杨国靖, 王帅, 等. 黄土丘陵沟壑区不同深度土壤水分对降雨的响应及其稳定性[J]. 干旱区地理. 2021, 44(2): 507−513. [Yao Xueling, Yang Guojing, Wang Shuai, et al. Soil moisture response and stability to rainfall in different depths in Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(2): 507−513.]

[11] 孙姗姗, 刘新平, 王翠萍, 等. 半干旱沙地樟子松林降雨再分配特征[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 109−117. [Sun Shanshan, Liu Xinping, Wang Cuiping, et al. Precipitation redistribution characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* in semiarid sandy land[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 109−117.]

[12] 张军红. 毛乌素沙地油蒿群落土壤水分分布与动态[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013. [Zhang Junhong. Distribution and dynamic of soil moisture in *Artemisia ordosica* community in Mu Us Sandy Land[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.]

[13] Yu X, Huang Y, Li E, et al. Effects of rainfall and vegetation to soil water input and output processes in the Mu Us Sandy Land, northwest China[J]. Catena, 2018, 161: 96−103.

[14] 董学军, 陈仲新, 阿拉腾宝, 等. 毛乌素沙地沙地柏(*Sabina vulgaris*)的水分生态初步研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(4): 311−319. [Dong Xuejun, Chen Zhongxin, A Latengbao, et al. A preliminary study on the water regimes of *Sabina vulgaris* in Maowusu Sandland, China[J]. Chinese Journal Plant Ecology, 1999, 23(4): 311−319.]

[15] 岳艳鹏, 孙迎涛, 庞营军, 等. 毛乌素沙地沙丘活化过程中油蒿(*Artemisia ordosica*)根系特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(3): 177−184. [Yue Yanpeng, Sun Yingtao, Pang Yingjun, et al. Root characteristics of *Artemisia ordosica* in the process of sand dunes activation in Mu Us Sandland[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(3): 177−184.]

[16] Dong Guangrong, Gao Shangyu, Jin Jiong, et al. The formation, evolution and cause of the Mu Us Desert in China[J]. Scientia in China (Series B), 1989, 32(7): 859−872.

[17] Wu B, Han H Y, He J, et al. Field-specific calibration and evaluation of ECH2O EC−5 sensor for sandy soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(1): 70−78.

[18] Wang X P, Zhang Y F, Hu R, et al. Revisit of event-based rainfall characteristics at Shapotou area in northern China[J]. Sciences in Cold and Arid Regions, 2016, 8(6): 477−484.

[19] 信乃诠, 王立祥. 中国北方旱区农业[M]. 北京: 中国农业出版

社, 2001: 89-125. [Xin Naiquan, Wang Lixiang. The study on dryland agriculture in north China[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2001: 89-125.]

[20] 周文君. 油蒿叶水分利用效率动态特征及其对环境因子的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2020. [Zhou Wenjun. Dynamics of leaf water use efficiency in *Artemisia ordosica* in response to environment factors[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.]

[21] Balugani E, Lubczynski M W, Tol C V D, et al. Testing three approaches to estimate soil evaporation through a dry soil layer in a semi-arid area[J]. Journal of Hydrology, 2018, 567: 405-419.

[22] Reynolds R, Belnap J, Reheis P, et al. Aeolian dust in Colorado Plateau soils: Nutrient inputs and recent change in source[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2001(98): 7123-7127.

[23] Li S, Bowker M A, Xiao B. Biocrusts enhance non-rainfall water deposition and alter its distribution in dryland soils-ScienceDirect [J]. Journal of Hydrology, 2021, 595(4): 126050, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126050.

[24] 贾晓红, 李新荣, 张景光, 等. 沙冬青灌丛地的土壤颗粒大小分形维数空间变异性分析[J]. 生态学报. 2006, 26(9): 2827-2833. [Jia Xiaohong, Li Xinrong, Zhang Jingguang, et al. Spatial heterogeneity analysis of fractal dimension of soil particle for *Ammopiptanhus mongolicus* shrub[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(9): 2827-2833.]

[25] Cheng L, Yue Y, Zhou H, et al. Biological soil crusts enhance the role of non-rainfall water in the water input in alpine sandy land ecosystems[J]. Journal of Hydrology, 2022, 610: 127966, doi: 10.1016/j.jhydrol.2022.127966.

[26] 张志山, 王新平, 李新荣, 等. 沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J]. 中国沙漠. 2005, 25(2): 243-248. [Zhang Zhishan, Wang Xinping, Li Xinrong, et al. Soil evaporation in artificially re-vegetated desert area[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(2): 243-248.]

[27] Mu J W, Zha T S, Jia X, et al. Influence of typical sandy shrubs on soil evaporation in Mu Us Sandland, northwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(12): 39-45.

[28] 周宏伟, 李生宇, 孙树国, 等. 自然覆盖物对塔里木沙漠公路防护林土壤蒸发的影响[J]. 科学通报, 2008(增刊 2): 123-130. [Zhou Hongwei, Li Shengyu, Sun Shuguo, et al. The effect of natural cover on soil evaporation in the protective forest of the Tarim Desert highway[J]. Chinese Science Bulletin, 2008(Suppl. 2): 123-130.]

[29] 贾天宇, 刘廷玺, 段利民, 等. 半干旱沙丘草甸过渡带人工杨树蒸腾耗水规律[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3255-3264. [Jia Tianyu, Liu Tingxi, Duan Limin, et al. Transpiration and water consumption of poplar trees in semi-arid dune meadow transition zone[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(10): 3255-3264.]

[30] Yao S X, Zhao C, Zhang T H, et al. Response of the soil water content of mobile dunes to precipitation patterns in Inner Mongolia, northern China-ScienceDirect[J]. Journal of Arid Environments, 2013, 97(12): 92-98.

[31] Wang S, Fu B J, Gao G Y, et al. Responses of soil moisture in different land cover types to rainfall events in a re-vegetation catchment area of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2013, 101(3): 122-128.

[32] 孙琰蕙, 张定海, 张志山. 腾格里沙漠不同类型沙丘土壤水分含量与地形-植被因子关系研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1570-1578. [Sun Yanhui, Zhang Dinghai, Zhang Zhishan. Relationship between soil moisture content and topography-vegetation factors in different types of dunes in the Tengger Desert[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1570-1578.]

[33] 姚淑霞, 张铜会, 赵传成, 等. 科尔沁地区不同类型沙地土壤水分的时空异质性[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 251-254, 258. [Yao Shuxia, Zhang Tonghui, Zhao Chuancheng, et al. Spatio-temporal variability of soil moisture in different dunes of Horqin Sandy Land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(1): 251-254, 258.]

[34] 乔闪闪, 吴磊, 彭梦玲. 人工模拟降雨条件下黄土坡面水-沙-氮磷流失特征[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1728-1735. [Qiao Shanshan, Wu Lei, Peng Mengling. Simulation of runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss on bare loess sloping land using simulated rainfall[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1728-1735.]

[35] Ao C, Yang P L, Zeng W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing-ScienceDirect[J]. Geoderma, 2019, 353: 372-381.

[36] Yu J, Lei T, Shainberg I, et al. Infiltration and erosion in soils treated with dry PAM and gypsum[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, 67(2): 630-636.

[37] 魏雅芬, 郭柯, 陈吉泉. 降雨格局对库布齐沙漠土壤水分的补充效应[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1346-1355. [Wei Yafen, Guo Ke, Chen Jiquan. Effect of precipitation pattern on recruitment of soil water in Kubuqi Desert, northwestern China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1346-1355.]

Dynamic change of soil moisture and its response to rainfall during the growing season in Mu Us Sandy Land based on continuous observation data

CHENG Long[1,2], WU Bo[1,2], JIA Xiaohong[1,2], YIN Jie[1,2], FEI Bingqiang[1,2],
ZHANG Lingguang[1,2], YUE Yanpeng[1,2], SUN Yingtao[1,2], LI Jia[1,2]
(1. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, Beijing, China; 2. Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem and Global Change, Beijing 100091, Beijing, China)

Abstract: Soil moisture is a crucial abiotic factor that limits the growth and development of plants and the ecological construction of sandy areas in semi-arid regions. In this study, continuous observations were performed on soil moisture at depths of 0−100 cm in shifting, semifixed, and fixed sandy land in the Mu Us Sandy Land during the growing seasons from 2008 to 2010 and from 2018 to 2021 (April to October). The dynamic changes in soil moisture and its response to rainfall were systematically analyzed. The results are as follows: (1) Affected by seasonal changes in rainfall, the seasonal variation of soil moisture in shifting, semifixed, and fixed sandy land exhibited a generally "∽"-shaped or double-peaked pattern. The soil moisture in the 10- and 30-cm depth ranges exhibited greater fluctuations, whereas that in the 60- and 100-cm depth ranges showed smaller fluctuations. (2) The dynamic differences in soil moisture during the growing season were significant among the three degrees of fixation. Overall, the shifting sandy land had the best soil moisture status with smooth changes, whereas the fixed sandy land had the worst soil moisture status with the most drastic changes. The semifixed sandy land fell between the two. The soil moisture in the 10−30 cm depth range of the fixed sandy land was better than that of the semifixed and shifting sandy lands, whereas the situation was opposite at depths of 30−100 cm. (3) The pattern of rainfall was the main factor determining the spatiotemporal distribution of soil moisture. As rainfall events occur and the amount of rain increases, the depth of rainwater infiltration gradually increases. However, deep replenishment of soil moisture in fixed sandy land requires higher rainfall amounts and longer periods. During the growing season, small rainfall events were dominant, resulting in greater fluctuations in soil moisture in the surface layers. At the beginning of the growing season, soil moisture below 10 cm was not replenished because of low rainfall and small rainfall events, resulting in poor soil moisture conditions. The shifting and semifixed sandy lands had better soil moisture at depths of 10−30 cm than at depths of 30−100 cm, whereas the opposite was true for the fixed sandy land. These results provide a scientific basis for the restoration of near-natural vegetation and the stable maintenance of sand-fixing vegetation on sandy decertified land in semi-arid regions.

Key words: Mu Us Sandy Land; growing season; spatiotemporal distribution of soil moisture; rainfall event; rainfall